

Studi Perencanaan Filter Hybrid Untuk Mengurangi Harmonisa Pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Rahman Efandi, Margo Pujiantara, dan R. Wahyudi.

Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: margo@ee.its.ac.id, efandinho7@gmail.com, wahyudi@ee.its.ac.id

Abstrak--Pakistan Deep Water Container Port merupakan proyek pembangunan pelabuhan peti kemas yang berada di kota Karachi, Pakistan. Sebagai salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan, Pakistan Deep Water Container Port harus memiliki target dalam jumlah proses bongkar-muat kapal-kapal kargo, baik dalam skala lokal maupun internasional per-harinya. Oleh karena itu diperlukan motor-motor untuk melakukan hal tersebut. Salah satu cara untuk mengoperasikan motor agar dapat bekerja maksimal dan efisien adalah dengan mengatur kecepatan putar motor menggunakan VFD (*Variable Frequency Drive*). Namun, dalam penggunaan VFD yang didalamnya terdapat komponen non linier, hal ini dapat menimbulkan masalah harmonisa, dimana frekuensi yang dihasilkan akan berpengaruh terhadap kualitas daya pada sistem kelistrikan yang ada serta dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan, seperti: trafo dan kabel. Untuk mencegah hal tersebut perlu dilakukan studi perencanaan pemasangan filter untuk meredam frekuensi harmonisa yang timbul.

Pada tugas akhir ini akan dirancang sebuah filter *hybrid* untuk mengurangi harmonisa yang timbul akibat adanya beban motor yang terpasang pada Pakistan Deep Water Container Port. Disini juga dilakukan studi berbagai kasus untuk mendapatkan hasil terbaik termasuk dalam penempatan filter pasif dan aktif, sehingga diperoleh keadaan yang maksimal dalam meredam harmonisa. Untuk pemodelan filter aktif dilakukan pada *software* Powersim sedangkan filter pasif dan filter *hybrid* dilakukan pada *software* ETAP 11.0.0.

Kata Kunci—Filter Aktif, Filter Hybrid, Filter Pasif, Harmonisa

I. PENDAHULUAN

Pakistan Deep Water Container Port merupakan salah satu pelabuhan terbesar di Pakistan. Pelabuhan ini cukup aktif melayani bongkar-muat peti kemas sehari-harinya, baik domestik maupun internasional. Diperlukan kontinuitas yang tinggi dalam unit ini, maka dari itu dibutuhkan VFD untuk mengatur kecepatan motor yang disesuaikan oleh jumlah proses bongkar-muat yang diinginkan. VFD merupakan salah satu sumber harmonisa. VFD digunakan pada saat *starting* motor dengan tujuan untuk memperkecil arus *starting* yang dihasilkan oleh motor tersebut. Berdasarkan data yang diambil pada plant tersebut, didapat distorsi harmonisa sebesar 20.7% padahal batas nilai distorsi harmonisa yang diijinkan menurut standar IEEE 519-1992 adalah sebesar 5%. Sehingga diperlukan pemasangan filter untuk meredam harmonisa tersebut. Pada umumnya jenis

filter yang digunakan untuk mengurangi harmonisa adalah jenis filter pasif dikarenakan harganya yang relatif murah.

Namun pada beberapa kondisi, penggunaan filter pasif belum cukup untuk mengurangi distorsi harmonisa yang ada. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini difokuskan pada pemodelan filter pasif dan filter aktif atau sering disebut dengan filter *hybrid* untuk mengurangi harmonisa yang terjadi pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port.

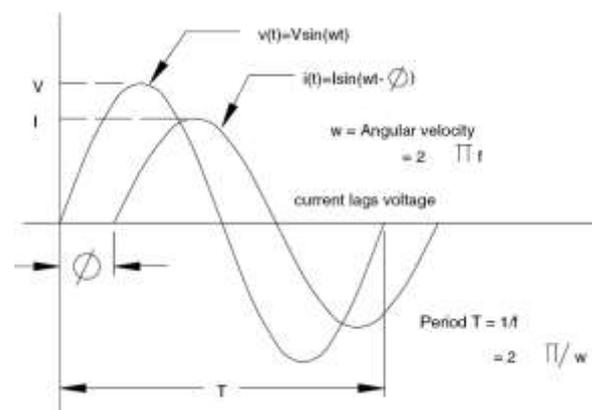
II. HARMONISA DAN FILTER

A. Pengertian Harmonisa

Idealnya bentuk gelombang tegangan dan arus sistem tiga fasa pada sistem tenaga listrik berbentuk sinusoidal, namun dengan berkembangnya beban listrik terutama pada beban non linier menimbulkan perubahan bentuk gelombang. Perubahan bentuk gelombang tersebut menyebabkan bentuk gelombang ac murni yang berupa sinusoidal menjadi tidak murni sinusoidal.

Pada sistem tenaga listrik, harmonisa dapat dikatakan sebagai cacat gelombang akibat adanya interferensi gelombang lain yang memiliki frekuensi kelipatan bilangan *integer* dari frekuensi fundamentalnya. [1]

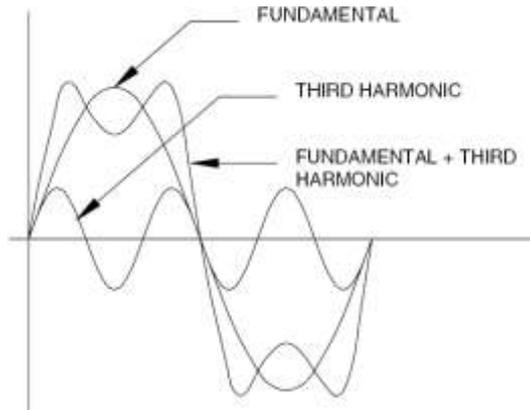
Fenomena harmonisa terjadi akibat adanya pembebanan non linier pada sistem. Harmonisa dapat menimbulkan kerugian pada sistem tersebut karena terjadi distorsi pada frekuensi fundamental. Akibat terjadinya harmonisa seperti : menurunnya kinerja dari peralatan, terjadi pemanasan pada peralatan secara berlebih dan penurunan kualitas daya pada sistem tersebut. Berikut adalah gambar gelombang tegangan dan arus sinusoidal murni dari sistem ac :



Gambar 1. Gelombang Sinusoidal Arus dan Tegangan

Akibat adanya sumber harmonik yang timbul, maka gelombang fundamental yang sebelumnya berbentuk sinusoidal, akan terdistorsi menjadi tidak sinusoidal. Hal ini terjadi akibat adanya penjumlahan dari gelombang sinusoidal fundamental dengan gelombang sinusoidal dari

harmonisa yang terjadi. Gelombang distorsi harmonisa dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini :



Gambar 2. Gelombang Hasil Penjumlahan Fundamental dan Harmonik

B. Metode Fourier Perhitungan Harmonisa

Pada Tahun 1822 J.B.J. Fourier, seorang ahli matematika dan fisika untuk pertama kalinya memperkenalkan teori *Fourier Series* lewat artikelnya yang berjudul “*Analytic Theory of Heat*”. Teori tersebut dapat diuraikan menjadi deret Fourier dengan persamaan sebagai berikut :

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega n t + b_n \sin \omega n t) \quad (1)$$

dengan

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (4)$$

Untuk mempercepat penyederhanaan analisa Fourier, digunakan sifat-sifat khusus gelombang sebagai berikut :

- Apabila luas siklus positif dan negatif adalah sama dalam satu periode, maka $a_0 = 0$.
- Apabila $(\omega t) = -(\omega t + \frac{T}{2})$ atau fungsi mempunyai simetri pada setengah gelombang positif dan negatif, maka akan muncul harmonik orde ganjil.
- Apabila $(\omega t) = (-\omega t)$ atau fungsi genap, maka $b_n = 0$.
- Apabila $(-\omega t) = f(-\omega t)$ atau fungsi ganjil, maka $a_n = 0$.

C. Total Harmonic Distortion (THD)

Nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) digunakan untuk menentukan nilai harmonisa yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik. Nilai THD juga menyatakan jumlah tegangan atau arus yang terdistorsi. Pada sistem tenaga listrik *Total Harmonic Distortion* (THD) didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya. Batas nilai (persentase) THD dari tegangan dan arus maksimal ini didasarkan sesuai dengan standar dari IEEE Std 519-1992. Perhitungan nilai THD dapat diselesaikan sesuai persamaan berikut :

$$THD = \frac{[\sum_{n=2}^k U_n^2]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\% \quad (5)$$

dengan

- U_n : komponen harmonisa
- U_1 : komponen fundamental
- k : komponen harmonisa maksimum yang diamati

Standar IEEE 519-1992 mengenai batasan nilai harmonisa yang diijinkan untuk nilai tegangan dan arus dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 1. Batas distorsi tegangan berdasarkan IEEE Std 519-1992 [2]

Tegangan Bus Pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	THD (%)
69 kV dan ke bawah	3	5
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV dan ke atas	1	1,5

Tabel 2. Batas distorsi arus berdasarkan IEEE Std 519-1992 [2]

Isc/I _L	Orde Harmonisa Individual (Harmonisa Orde Ganjil)					TDD
	<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	
	<20*	4	2	1,5	0,6	
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari Harmonisa orde ganjil di atas.
 Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan sistem DC, contohnya converter setengah gelombang.
 *Semua peralatan pembangkit listrik terbatas pada nilai-nilai distorsi arus terlepas dari Isc/I_L aktual.
 dimana :
 Isc = Arus hubung singkat maksimum pada PCC
 I_L = Arus beban maksimum (frekuensi fundamental) pada PCC

Berdasarkan Tabel 2 diatas, *Total Demand Distortion* (TDD) merupakan perbandingan nilai rms antara komponen arus harmonisa dengan arus beban *demand* maksimum. Pada saat beban penuh $THD_I = TDD$, maka TDD merupakan besar distorsi arus pada sistem. Berikut adalah perhitungan TDD :

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (6)$$

Untuk melakukan perhitungan tegangan distorsi (THD_v) dan arus distorsi (THD_I) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{dan} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (7)$$

D. Sumber-Sumber Harmonisa

Pada umumnya, terjadinya harmonisa disebabkan karena pengoperasian beban non linier. Berdasarkan klasifikasi pembebanan pada sistem tenaga listrik dibedakan menjadi beban linier dan non linier. Beban linier adalah beban yang memiliki nilai arus berbanding secara linier terhadap tegangan beban. Sehingga pada beban linier nilai gelombang arus akan sama dengan nilai gelombang tegangan beban. Karakteristik beban non linier berbeda dengan beban linier, yaitu bentuk gelombang yang ditarik oleh beban non linier ini tidak berbentuk sinusoidal tetapi periodik. Hal tersebut menyebabkan nilai arus tidak sama dengan nilai gelombang tegangan. Hal tersebut yang merupakan penyebab utama terjadi distorsi gelombang harmonisa. Berikut adalah beberapa peralatan dalam sistem tenaga listrik yang dapat menyebabkan terjadinya harmonisa :

- Konverter
- Tanur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*)

- ▶ Transformator
- ▶ Mesin-Mesin Listrik

E. Filter Harmonisa

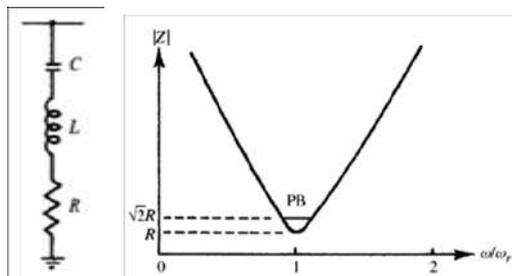
Penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber harmonisa perlu dilakukan, sehingga penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Karena pemasangan filter harmonisa bertujuan untuk mengurangi amplitudo satu atau lebih frekuensi tertentu dari tegangan dan arus [3]. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental juga dapat mengkompensasi daya reaktif sehingga dapat dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem.

F. Perencanaan Filter Hybrid

Perencanaan filter *hybrid* dimodelkan dalam bentuk kombinasi antara pemasangan filter pasif dan filter aktif. Pemasangan filter pasif dimodelkan pada *software* ETAP sedangkan filter aktif dimodelkan pada *software* Psim. Dalam menentukan parameter dan spesifikasi filter, nilai kVAR dari filter juga diperhitungkan sehingga selain mampu mengatasi harmonisa, pemasangan filter juga mampu memperbaiki nilai faktor daya yang ada pada sistem kelistrikan tersebut.

G. Perencanaan Filter Pasif

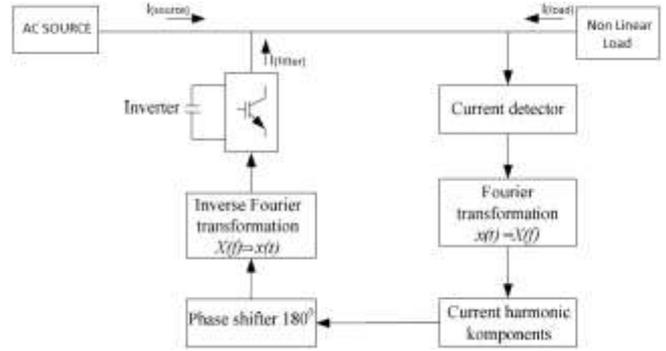
Filter yang digunakan untuk mengatasi harmonisa adalah tipe *single tuned*. Filter *single tuned* merupakan filter dengan penalaan tunggal yang menala salah satu orde harmonisa. Proses penalaan orde bergantung pada nilai orde harmonisa yang timbul. Selain itu, proses ketajaman penalaan juga bergantung pada faktor kualitas filter (Q). Pada umumnya, nilai Q berkisar antara 30 – 60. Semakin tinggi nilai Q maka semakin tajam proses penalaannya. Berikut adalah gambar karakteristik filter *single tuned* :



Gambar 3. Rangkaian filter *single tuned* (kiri) dan grafik fungsi frekuensi terhadap impedansi (kanan)

H. Perencanaan Filter Aktif

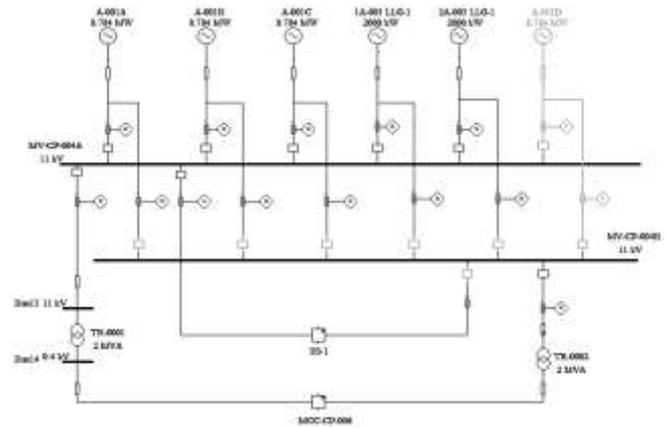
Filter aktif yang digunakan adalah tipe *shunt* (paralel). Konsep kerja filter aktif dengan PWM (*Pulse Width Modulation*) berbasis inverter yaitu penggunaan arus harmonisa untuk menanggulangi arus harmonisa dari beban non linier. Filter aktif yang disusun secara paralel akan menyuntikkan atau menginjeksikan arus harmonisa dengan sudut fasa yang berkebalikan dengan arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non linier. Filter aktif ini menggunakan sumber tegangan dc sebagai *supply* dan dapat melakukan proses *switching* pada frekuensi tinggi untuk menghasilkan sinyal yang mampu mengatasi arus harmonisa yang dihasilkan beban non linier. Penggunaan VSI (*Voltage source Inverter*) untuk memungkinkan pengaturan arus harmonisa pada filter aktif. Berikut adalah gambar mekanisme kerja dari filter aktif paralel :



Gambar 4. Blok diagram mekanisme kerja filter aktif

III. SISTEM KELISTRIKAN PROYEK PAKISTAN DEEP WATER CONTAINER PORT

Terdapat 7 unit pembangkit yang ada di *Pakistan Deep Water Container Port*. Kapasitas masing-masing pembangkit diantaranya : 4 unit kapasitas 8.784 MW, 2 unit kapasitas 2 MW dan 1 unit berkapasitas 815 kW. Pembangkit utama terhubung menuju beban melalui 2 bus utama, yaitu : MV-CP-004A dan MV-CP-004B. Pada *plant* ini terdapat 2 buah *network utility* utama, yaitu SS-1 dan MCC-CP-006. Pada *network utility* tersebut, di dalamnya terdapat semua beban yang ada pada *plant* ini. Beban-beban tersebut seperti : motor, *lump*, dsb. Berikut adalah gambar sistem kelistrikan *plant* tersebut :



Gambar 5. Single line diagram sistem kelistrikan utama Proyek Pakistan Deep Water Container Port

Berdasarkan *single line diagram*, terdapat 5 unit pembangkit yang aktif beroperasi sedangkan 2 pembangkit difungsikan sebagai *back-up* ketika kelima generator yang aktif beroperasi tersebut mengalami gangguan dan pada saat starting motor-motor berkapasitas besar yang ada pada *plant* tersebut. Kapasitas pada masing-masing pembangkit tercantum pada tabel 3 sebagai berikut :

Tabel 3. Data kapasitas pembangkit

No	ID	MW	MVar	kV	%PF
1	A-001A (<i>Swing</i>)	8.784	4.821	11	80
2	A-001B (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
3	A-001C (<i>Voltage Control</i>)	8.784	2.812	11	80
4	1A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
5	2A-003 LLG 1 (<i>MVar Control</i>)	2	0.5	11	80
6	A-001D (<i>Swing Backup</i>)	8.784	0	11	80
7	A-001E (<i>Voltage Control Backup</i>)	0.815	0	11	85

Sedangkan untuk jumlah pembangkitan, pembebanan dan *demand* pada *plant* tersebut dapat dilihat pada Tabel 4 berikut :

Tabel 4. Data pembangkitan, pembebanan dan demand

Nama	MW	Mvar	MVA	%PF
Source (Swing Bus)	22.898	11.887	25.858	88.75 Lag
Source (Non Swing Bus)	0	0	0	-
Total Demand	22.898	11.887	25.858	88.75 Lag
Total Motor Load	21.444	10.69	23.961	89.5 Lag
Total Static Load	1.305	0.937	1.606	81.23 Lag

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS HARMONISA

A. Simulasi Harmonisa pada Sistem Kelistrikan

Proses simulasi harmonisa dilakukan pada bus-bus yang terdapat sumber utama harmonisa berupa VFD. Pada *plant* Pakistan Deep Water Container Port, bus-bus harmonisa berada pada *network* SS-6 dan *network* SS-7, bus-bus tersebut diantaranya : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B. Pada bus harmonisa tersebut terdapat motor dengan kapasitas besar yang dilengkapi dengan VFD.

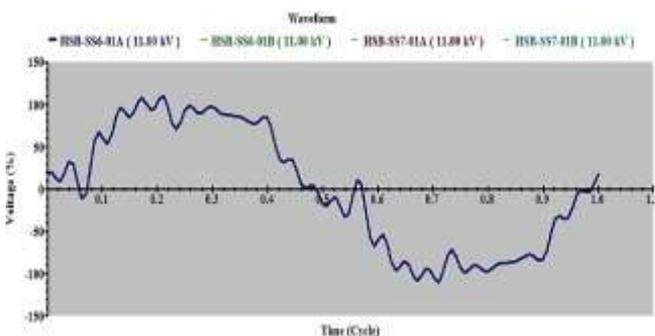
B. Distorsi Harmonisa Terhadap Tegangan

Berdasarkan hasil simulasi harmonisa yang dilakukan pada poin A, didapat data persentase harmonisa tegangan dari keempat bus sumber harmonisa tersebut. Hasil persentase nilai harmonisa tegangan (THDv) jauh melebihi standar yang ditetapkan IEEE. Standar yang sesuai untuk tegangan 11 kV untuk THDv adalah sebesar 5% sedangkan pada *plant* melebihi 20%. Nilai individual harmonik pada orde tertentu yang diijinkan adalah sebesar 3%, namun pada semua orde dalam kondisi melebihi batas yang ditetapkan. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel 5 berikut :

Tabel 5. Persentase harmonisa pada tegangan fundamental

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	11.22	20.74	13.6	6.52	5.91	2.96	5.31	4.26	8.02	6.88
HSB-SS6-01B	11.22	20.74	13.6	6.52	5.91	2.96	5.31	4.26	8.02	6.88
HSB-SS7-01A	11.22	20.66	13.5	6.50	5.88	2.95	5.29	4.24	7.99	6.87
HSB-SS7-01B	11.22	20.66	13.5	6.50	5.88	2.95	5.29	4.24	7.99	6.87

Berdasarkan tabel 5, orde harmonisa tertinggi yang muncul adalah orde kelima dan kedua puluh tiga. Sedangkan untuk nilai harmonisa tegangan pada *network* SS-6 dan SS-7 relatif sama, yakni berkisar 20%. Hal tersebut dikarenakan pada kedua *network* tersebut memiliki jumlah VFD dan pembebanan yang relatif berimbang (sama). Berikut adalah gelombang tegangan hasil simulasi harmonisa :



Gambar 6. Gelombang tegangan pada *network* SS-6 dan SS-7 sebelum pemasangan filter

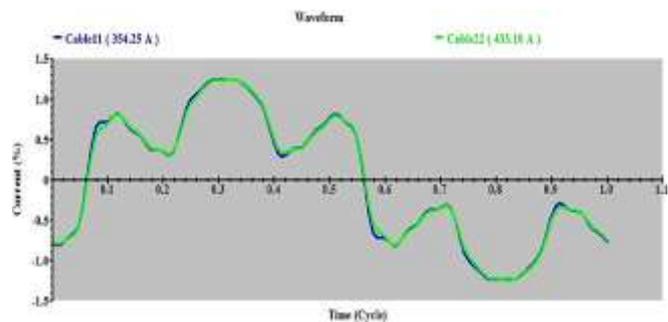
C. Distorsi Harmonisa Terhadap Arus

Untuk mengetahui nilai harmonisa arus ketika simulasi harmonisa dipilih atau diplot kabel 11 dan 22 yang merupakan sumber input dari bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A. Berikut adalah data hasil simulasi tersebut :

Tabel 6. Persentase harmonisa pada arus fundamental

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
cab11	354.2	46.88	42.99	14.8	8.45	3.51	4.4	2.91	3.57	2.41
cab22	354.2	46.88	42.99	14.8	8.45	3.51	4.4	2.91	3.57	2.41

Berdasarkan hasil simulasi *Load Flow* pada *network* SS-6 dan SS-7 didapatkan nilai *Isc* sebesar 22.45 kA dan 16.6 kA. Untuk nilai *I_L* didapat 354.12 A dan 432 A. Untuk mengetahui standar harmonisa untuk arus perlu perhitungan *Isc/ I_L*, hasil perhitungan tersebut mendapatkan nilai sebesar 63.4 A dan 38.43 A. Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut *Isc/ I_L* dibuat sebagai referensi untuk penentuan standar harmonisa sesuai tabel 2. Berdasarkan tabel 2 didapatkan batas maksimum untuk *Total Harmonic Distortion* (THDi) pada SS-6 sebesar 12% dan SS-7 sebesar 8%. Berdasarkan tabel 6 dapat disimpulkan bahwa nilai THDi dan individual harmonik per-orde pada *cab11* dan *cab22* telah melewati batas yang ditentukan. Berikut adalah gelombang arus hasil simulasi harmonisa :



Gambar 7. Gelombang arus pada *network* SS-6 dan SS-7 sebelum pemasangan filter

D. Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Pasif

Proses filterisasi dimulai pada bus yang memiliki tingkat harmonisa terbesar. Berdasarkan simulasi harmonisa, orde 5 merupakan orde yang memiliki tingkat distorsi harmonisa terbesar. Berikut adalah perhitungan spesifikasi dari filter orde 5 :

$$kVAR = 1787$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 \times V_{LL}^2}$$

$$C = \frac{1787}{(2\pi \times 50) \times (11)^2} = 47.01 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 5)^2 \times 47.01 \times 10^{-6}} = 8.6299 \times 10^{-3} H$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 8.6299 \times 10^{-3} = 2.7098 \Omega$$

$$Q_{factor} = 30$$

$$R = \frac{2.7098}{30} = 0.0903 \Omega$$

Nilai kVAR yang dimasukkan ke dalam perhitungan adalah sesuai dengan faktor daya yang akan dicapai. Batasan penentuan nilai kVAR harus disesuaikan dengan nilai kVAR yang terdapat pada generator. Karena apabila tidak sesuai generator akan mengalami *underexcited*. Hasil yang didapat setelah proses *filtering* orde 5 ini, yaitu terjadi penurunan distorsi harmonisa yang cukup signifikan pada orde tersebut. Namun, untuk distorsi harmonisa yang terjadi pada orde lainnya masih cukuplah tinggi. Sehingga perlu dipasang filter kembali yang sesuai dengan orde harmonisa yang timbul. Mekanisme proses perhitungan filter untuk orde berikutnya pada intinya sama dengan perhitungan filter orde 5, hanya saja disesuaikan dengan nilai orde harmonisa dan nilai kVAR. Berikut adalah ringkasan hasil proses perhitungan filter pasif :

Tabel 7. Ringkasan perhitungan filter pasif

	Orde	kVAR	C (μF)	XL (Ω)	Q	R (Ω)	SS-6		SS-7	
							THDv	THDi	THDv	THDi
SS-6	5	1787	47.01	2.7098	30	0.0903	11.47	52.81	11.48	44.69
	7	213	5.603	11.5998	30	0.3866	9.85	54.74	9.86	44.62
	11	259	6.813	3.8631	30	0.1287	6.97	55.31	7.01	44.54
	17	46	1.21	9.1072	30	0.3035	5.46	55.42	5.51	44.51
	23	38	1	6.0202	30	0.2006	3.61	55.49	3.66	44.48
SS-7	5	1787	47.01	2.7098	30	0.0903	3.08	18.39	3.1	16.92
	7	103	2.71	23.983	30	0.7994	2.92	12	2.94	11.66
	11	103	2.71	9.7121	30	0.3237	2.75	9.13	2.77	9.14
	17	84	2.21	4.9863	30	0.1662	2.46	8.51	2.47	9.07
	23	57	1.499	4.0161	30	0.138	2.45	8.16	2.45	8.92

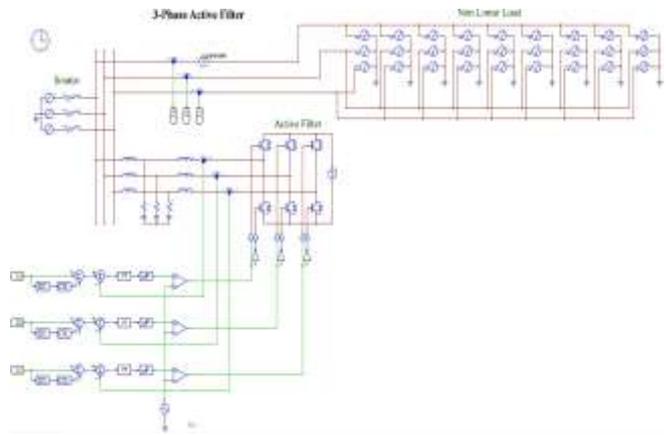
Data pada tabel 7 (di atas) menunjukkan perhitungan filter pasif beserta hasil respon harmonisa yang diredam dari setiap filter yang dipasang. Pemasangan filter dilakukan pada *network* SS-6 dan *network* SS-7 (bus : HSB-SS6-01A, HSB-SS6-01B, HSB-SS7-01A, dan HSB-SS7-01B) untuk setiap orde 5, 7, 11, 17 dan 23. Hasil yang diperoleh setelah pemasangan filter pasif ternyata nilai THDi masih melebihi batas yang ditentukan. Sedangkan untuk harmonisa tegangan nilai THDv dan individual harmonik pada semua orde telah memenuhi batas yang ditentukan. Nilai THDi pada *network* SS7 sebesar 8.92, sedangkan standar maksimum yang diperbolehkan sebesar 8%. Dalam hal ini, dapat dikatakan bahwa pemasangan filter pasif pada *plant* ini belum dapat menurunkan nilai THDi.

E. Pemasangan dan Perhitungan Spesifikasi Filter Aktif

Pemasangan filter aktif pada *plant* Pakistan Deep Water Containeer Port dilakukan untuk meredam distorsi harmonisa yang tidak dapat teredam menggunakan filter pasif. Simulasi pembuatan filter aktif dilakukan pada *software* Psim dengan memasukkan data VFD yang terdapat pada ETAP. Pada tugas akhir ini, VFD yang dimasukkan pada Psim merupakan VFD untuk motor yang berkapsitas besar. Data yang dimasukkan ke Psim berupa karakteristik nilai *magnitude* dari VFD tersebut. Setelah itu dilakukan *running* program dan didapat nilai *magnitude* VFD hasil proses *filtering*. Kemudian hasil berupa *magnitude* tersebut dikonversikan kembali kedalam bentuk VFD baru pada ETAP. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberi filter aktif. Selanjutnya dilakukan *running* harmonisa kembali pada ETAP dan didapatkan hasil dari penggunaan kombinasi filter pasif dan aktif atau biasa disebut filter *hybrid*. Berikut adalah data beban non linier dan gambar rangkaian dari filter aktif beserta parameternya :

Tabel 8. Data beban non linier (kiri) dan Parameter filter aktif (kanan)

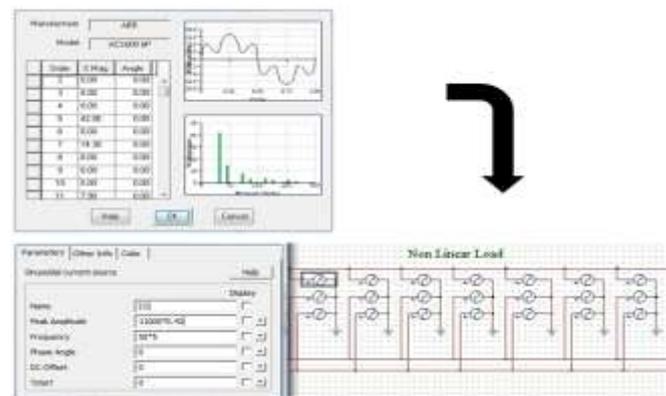
Data Beban Non linier		Parameter Filter Aktif	
Orde	Nilai	Elemen	Parameter
5	42%	Vdc	1000 V
7	14.3%	L ₁	0.002 H
11	7.9%	L ₂	0.0005 H
13	3.2%	R	0.1 Ω
17	3.7%	C	2 μF
19	2.3%	K _F	10
23	2.3%	K _C	5
25	1.4%	F _c	10020 Hz



Gambar 8. Pemodelan rangkaian filter aktif pada Psim

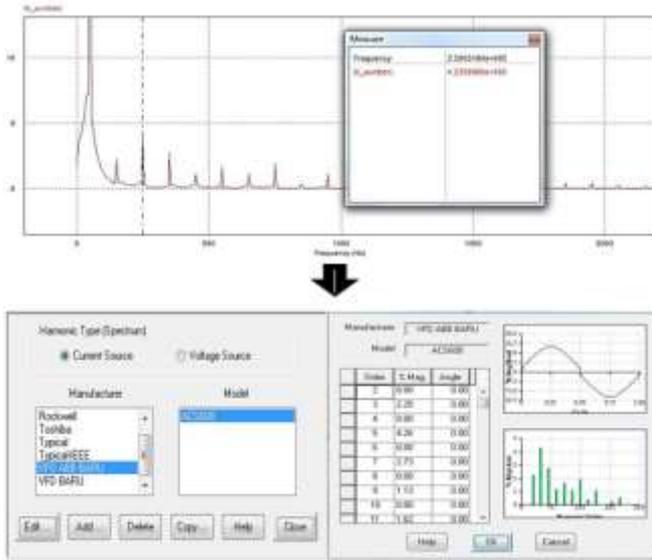
F. Simulasi Filter Aktif pada Psim

Untuk melakukan simulasi pada Psim, terlebih dahulu dilakukan pengambilan data karakteristik VFD pada *plant* Pakistan Deep Water Containeer Port yang terdapat didalam ETAP. Mekanisme pengambilan data karakteristik VFD dari ETAP adalah dengan mengambil data *magnitude* dari VFD tersebut kemudian memasukkan kedalam sumber harmonik yang terdapat pada rangkaian filter aktif pada Psim. Nilai *magnitude* dari VFD dimasukkan ke dalam sumber harmonik (*Non Linier Load*) yang ada pada Psim sesuai dengan orde atau frekuensinya. Berikut adalah mekanismenya :



Gambar 9. Konversi data VFD dari ETAP ke Psim

Untuk mendapatkan data *magnitude* VFD baru perlu dilakukan *running Fast Fourier Transform* (FFT) pada gelombang hasil simulasi filter aktif yang terdapat pada Psim. Kemudian didapatkan *magnitude* harmonisa sesuai dengan orde masing-masing. Setelah itu, nilai *magnitude* tersebut dikonversikan kedalam ETAP dalam bentuk VFD baru. VFD baru tersebut merupakan VFD yang telah diberikan filter aktif. Berikut adalah mekanisme konversi data VFD baru ke dalam ETAP.



Gambar 10. Konversi data VFD baru dari Psim ke ETAP

Setelah dikonversi dari Psim ke ETAP, VFD baru yang telah diberikan filter aktif tersebut dipasang pada motor yang memiliki kapasitas terbesar pada *network* SS-6 dan SS-7. Berikut ditampilkan data persentase harmonisa pada bus dan kabel setelah pemasangan filter *hybrid* pada *network* SS-6 dan SS-7 :

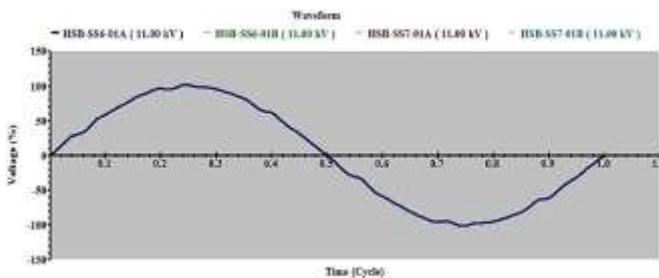
Tabel 9. Persentase harmonisa tegangan pada orde tertentu setelah pemasangan filter hybrid

BUS ID	kV	THDv (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
HSB-SS6-01A	10.99	1.99	0.32	0.60	0.12	1.15	0.07	1.27	0.03	0.65
HSB-SS6-01B	10.99	1.99	0.32	0.60	0.12	1.15	0.07	1.27	0.03	0.65
HSB-SS7-01A	11	1.98	0.30	0.60	0.12	1.14	0.06	1.26	0.02	0.65
HSB-SS7-01B	11	1.98	0.30	0.60	0.12	1.14	0.06	1.26	0.02	0.65

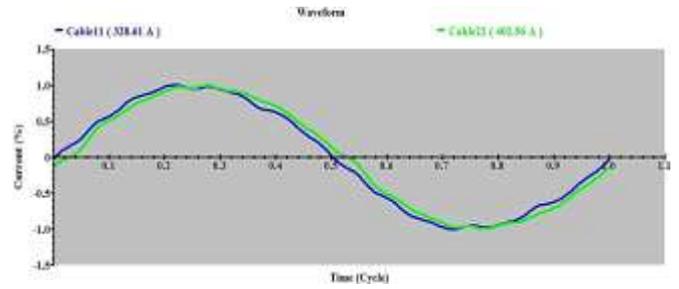
Tabel 10. Persentase harmonisa arus pada orde tertentu setelah pemasangan filter hybrid

ID	Arus (A)	THDi (%)	ORDE (%)							
			5	7	11	13	17	19	23	25
Cable 11	329.6	7.93	7.03	2.37	1.42	1.25	1.42	1.16	0.66	0.48
Cable 22	403.3	6.22	5.07	2.06	1.31	1.42	1.10	0.56	0.52	0.17

Setelah dipasang filter *hybrid* kedalam sistem, nilai THDi yang sebelumnya melebihi standar yang ditentukan, sekarang memenuhi dari batas nilai yang ditentukan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk meredam semua distorsi harmonisa yang terdapat pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port dibutuhkan pemasangan filter *hybrid* pada plant tersebut. Berikut ditampilkan gelombang tegangan dan arus setelah pemasangan filter *hybrid* :



Gambar 11. Gelombang tegangan hasil pemasangan filter hybrid



Gambar 12. Gelombang arus hasil pemasangan filter hybrid

V. KESIMPULAN

Setelah dilakukan proses simulasi dan analisis pemasangan filter hybrid pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port maka selama proses tersebut penulis dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penempatan pemasangan filter hybrid telah sesuai, yaitu pada bus yang terdapat didalam *network* SS-6 dan SS-7. Bus-bus tersebut merupakan sumber utama harmonisa pada plant tersebut. Sehingga setelah pemasangan filter, didapatkan hasil yang maksimal dalam peredaman harmonisa dan sesuai dengan standar IEEE 519-1992.
2. Perhitungan spesifikasi filter telah sesuai, hal tersebut dapat dibuktikan bahwa sebelum dipasang filter nilai THDv = 20.74% dan THDi = 46.88% pada *network* SS-6 sedangkan pada *network* SS-7 nilai THDv = 20.66 dan THDi = 45.11. Setelah dilakukan perhitungan dan pemasangan filter hybrid, nilai harmonik tersebut turun menjadi THDv = 1.99% dan THDi = 7.93% pada *network* SS-6. Sedangkan pada *network* SS-7 nilai THDv = 1.98% dan THDi = 6.22%. Selain itu, pemasangan filter juga mampu meningkatkan nilai *Power Factor* dari 93.7% menjadi 100% serta dari 92.1 menjadi 99.1% (pada Bus HSB-SS6-01A dan HSB-SS7-01A).
3. Pemasangan filter pada *network* SS-6 hanya mampu untuk menurunkan harmonisa tegangan (THDv) saja. Sehingga perlu pemasangan filter pada *network* SS-7 untuk menurunkan nilai harmonisa arus (THDi).
4. Pemasangan filter *hybrid* perlu dilakukan pada plant tersebut, karena dengan pemasangan filter pasif saja belum mampu untuk menurunkan nilai harmonisa arus (THDi) pada *network* SS-7 sesuai dengan standar IEEE 519-1992.
5. Filter *hybrid* yang dipasang pada plant ini berupa filter pasif yang kinerjanya dikombinasikan dengan filter aktif. Simulasi pemasangan filter aktif di plant ini dikonversikan dalam bentuk VFD baru dan dipasang pada motor dengan kapasitas terbesar.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Margo Pujiantara, "Penyempurnaan Desain Filter Harmonisa Menggunakan Kapasitor Eksisting Pada Pabrik Soda Kaustik di Serang-Banten", JAVA Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 1, No. 2, Oct 2003, ISSN 1412-8306.
- [2]. IEEE, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", 1987. IEEE Std.519-1992.
- [3]. Stevenson W.D, "Electrical Power System Analysis", Fourth Edition, McGraw-Hill, London,1993.